

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Pat ntschrift
11 DE 3540157 C2

27 Aktenzeichen: P 35 40 157.5-35
29 Anmeldetag: 13. 11. 85
48 Offenlegungstag: 21. 5. 87
56 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 14. 7. 88

53 Int. Cl. 4:
G01S 17/10



DE 3540157 C2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

13 Patentinhaber:

Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, 8012
Ottofurt, DE

17 Erfinder:

Manhart, Sigmund, Dipl.-Phys.; Dyne, Peter,
Dipl.-Phys., 8013 Haar, DE; Kunkel, Bernd,
Dipl.-Phys., 8011 Kirchheim, DE

55 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 32 19 452 A1
DE 32 19 423 A1
DE 31 03 567 A1

54 Verfahren und Vorrichtung zur Entfernungsmessung nach dem Impulslaufzeitprinzip

Patentsprüche

1. Verfahren zur Messung der Distanz zu einem Objekt nach dem Laserradar-Impulslaufzeitprinzip, wobei zur Erzeugung sowohl der Start-Signale über Verzögerungsleitungen, als auch zur Erzeugung der Stop-Signale für die Laufzeitmessung des Laserimpulses nur ein einziger Empfangsdetektor verwendet wird, dadurch gekennzeichnet,
- daß ein erster Bruchteil des Lasersendesignals (erstes Referenzsignal) über eine erste optische Verzögerungsstrecke (22) (erste Referenzstrecke) und gleichzeitig ein zweiter Bruchteil des Lasersendesignals (zweites Referenzsignal) über eine zweite, optisch längere Verzögerungsstrecke (23) (zweite Referenzstrecke) direkt dem Empfangsdetektor (30) zugeführt und der Rest des Lasersendesignals zur Erzeugung eines Zielechosignals (ZS) verwendet wird, und
- daß die Zeitdifferenz (Zielintervall) zwischen dem ersten Referenzsignal (Ref1) und dem Zielechosignal (ZS) als Maß für die Zielentfernung und die Zeitdifferenz (Eichintervall) zwischen dem ersten Referenzsignal (Ref1) und dem zweiten Referenzsignal (Ref2) als Eichmaß verwendet wird und
- daß die tatsächliche Zielentfernung aus dem Verhältnis der beiden Zeitintervalle ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß nur ein Zeitauswertekanal verwendet wird und daß das Zielintervall und das Eichintervall in zeitlicher Aufeinanderfolge gemessen werden und daß zur Unterscheidung des Zielechosignals (ZS) vom zweiten Referenzsignal (Ref2) eine schnelle Umschaltvorrichtung verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß durch Verwendung zweier Zeitauswertekanäle gleichzeitig das Zielintervall und das Eichintervall gemessen werden und die eindeutige Zuordnung durch unterschiedliche Zeitfenster erfolgt.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Vermeidung systematischer Fehler beide Auswertekanäle durch Umschaltung der Zeitfenster abwechselnd das Zielintervall und das Eichintervall bestimmen.
5. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die schnelle Umschaltung bzw. die Erzeugung der Zeitfenster rein elektronisch durch Schalten eines Zeittriggers erfolgt.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die zu messenden Zeitintervalle mit Hilfe eines hochfrequenten, nicht notwendigerweise quarzstabilisierten, Oszillators (46) ausgezählt werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—5, dadurch gekennzeichnet, daß die zu messenden Zeitintervalle durch an sich bekannte Zeitdehn- und Meßverfahren (TAC, TTC u. a.) ausgewertet werden und daß die implementierten Referenzströme bzw. -spannungen nicht stabilisiert sind.
8. Laserimpulsradarsystem zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, wobei ein Teil des Lasersendesignals ausgekoppelt und über Verzögerungsleitungen auf den Empfangsdetektor gekoppelt ist, dadurch gekennzeichnet, daß zwei parallele Verzögerungsstrecken (22; 23) aus unterschiedlich langen Lichtwellenleitern bestehen, wobei die erste optische Verzögerungsstrecke (22) kurz, die zweite (23) aber optisch länger als die doppelte Zielentfernung ist, so daß das Zielechosignal (ZS) zeitlich immer zwischen den beiden Referenzsignalen (Ref1; Ref2), die über die Verzögerungsleitungen (22; 23) zum Detektor gelangen, liegt.
9. Laserimpulsradarsystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß sendeseitig eine zusätzliche Verzögerungsleitung (14) zwischen den Kopplern (12; 13) für die beiden Referenzsignale Ref1, Ref2 und einer Sendeoptik (15) eingefügt ist, so daß das Zielechosignal (ZS) für jeden Zielabstand immer später als beide Referenzsignale (Ref1, Ref2) am Detektor eintrifft.
10. Laserimpulsradarsystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß empfängerseitig eine zusätzliche Verzögerungsleitung zwischen einer Empfangsoptik (35) und den Kopplern (32; 33) eingefügt ist, so daß das Zielechosignal (ZS) für jeden Zielabstand immer später als beide Referenzsignale (Ref1, Ref2) am Detektor eintrifft.

Beschreibung

- Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Messung der Distanz zu einem Objekt nach dem Laserradar-Impulslaufzeitprinzip, wobei zur Erzeugung sowohl der Start-Signale über Verzögerungsleitungen als auch zur Erzeugung der Stop-Signale für die Laufzeitmessung nur ein einziges Detektorelement verwendet wird.
- Die Erfindung bezieht sich auch auf ein Laserradarimpulssystem zur Durchführung des Verfahrens.
- Bei Laserentfernungsmessern wird die Entfernung zu einem Zielobjekt aus der Laufzeit eines modulierten Lasersignals vom Meßgerät zum Zielobjekt und zurück zum Meßgerät bestimmt. Die Zeitdifferenz ΔT zwischen Aussenden des Lasersignals und Empfang des vom Zielobjekt reflektierten Signals ist ein direktes Maß für die Entfernung D zum Zielobjekt:

$$D = \frac{c}{2n_0} \Delta T.$$

- c ist dabei die Vakuumlichtgeschwindigkeit, n_0 der Brechungsindex des Übertragungsmediums ($c = 299\,793$ km/s, $n_0 \approx 1,0003$ für Normalatmosphäre).
- Zur genauen Entfernungsbestimmung ist eine präzise Zeitintervallmessung erforderlich. So entspricht beispielsweise eine Änderung der Zielentfernung um 1 mm einer Laufzeitänderung von nur 6,7 ps. Gewöhnlich

werden Maßnahmen zur Meßgrößenumwandlung ergriffen, damit die erforderliche Zeitauflösung erreicht werden kann. Entweder wird das zu messende Zeitintervall durch elektronische Verfahren gestreckt oder in eine andere, leichter zu erfassende Meßgröße umgewandelt. Im folgenden sind einige bekannte Verfahren aufgeführt:

Bei kontinuierlich modulierten Strahlungsquellen wird die Phasenlage des Sendesignals mit der Phasenlage des Empfangssignals verglichen. Die Zeitdehnung erfolgt durch Mischen beider Signale mit einem Lokaloszillator, dessen Frequenz gegenüber der Sendefrequenz geringfügig verschoben ist. Die Zwischenfrequenzen beim Sendesignal und beim Empfangssignal weisen dieselbe Phasendifferenz auf wie die Originalfrequenzen. Somit wird mit Hilfe der Frequenzmischung eine Zeitdehnung um das Verhältnis Sendefrequenz/Zwischenfrequenz erzielt.

Bei der Einzelpulsmessung erfolgt die Laufzeitbestimmung häufig dadurch, daß während des zu messenden Zeitintervalls ein Kondensator mit konstantem Strom geladen wird. Nach Beendigung der Ladezeit wird der Ladezustand entweder direkt über die anliegende Spannung gemessen (TAC = time-to-amplitude conversion = Zeitamplituden-Umwandlung), oder der Kondensator wird anschließend mit einem konstanten, aber wesentlich geringerem Strom wieder entladen, wobei die Entladezeit einer Dehnung der Ladezeit und damit einer Streckung des zu messenden Zeitintervalls entspricht (TTC = time-to-time conversion = Zeit-Zeit Umwandlung).

Bei allen Verfahren, die eine präzise Entfernungsbestimmung zum Ziel haben, wird ein einziger Detektor und Vorverstärker sowohl für das ausgehende Signal (Referenz- oder Start-Signal) als auch für das reflektierte Zielsignal (Meß- oder Stop-Signal) verwendet, damit die elektronischen Verzögerungen im Detektor und Vorverstärker für beide Signale gleich sind. Näheres dazu ist beispielsweise aus EP 00 57 447 A1 zu entnehmen.

Die bekannten Verfahren weisen jedoch einige Nachteile auf. So muß bei kontinuierlicher Signalmodulation zwischen zwei optischen Meßstrecken, nämlich der Zielmeßstrecke und der Referenzmeßstrecke, umgeschaltet werden. Die Umschaltung, die mechanisch oder elektrooptisch erfolgt, beeinflußt die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer. Darüberhinaus erfordert eine genaue Phasenmessung relativ lange Meßzeiten.

Bei der Pulslaufzeitmessung entfällt die mechanische oder elektrooptische Meßkanalumschaltung, da das Referenzsignal und das vom Zielobjekt reflektierte Signal zeitlich unterschiedlich am Detektor eintreffen und die Umschaltung auf rein elektronische Weise durch Setzen eines Zeittriggers oder mehrerer Zeittriggers direkt in der Signalauswertung erfolgen kann. Das Zeitintervall zwischen Referenz- und Zielsignal kann nun — wie oben dargelegt — auf verschiedene Weise gemessen werden, entweder durch Zeit-Amplituden-Umwandlung (TAC) oder durch eine Zeitdehnung (TTC).

Die TAC-Auswertung ist ungenau aufgrund der mangelnden Ladesromkonstanz, der Temperaturabhängigkeit der Kondensatorkapazität, des Kondensatorleakstroms und der Instabilität der Komparatorschaltwellen.

Die Genauigkeit der TTC-Auswertung ist beschränkt durch die Ungenauigkeit des Lade- und Entladestroms und durch die Temperaturabhängigkeit der Schaltschwellen. Weiterhin ist für die Ausmessung des gestreckten Zeitintervalls eine genaue Zeitbasis erforderlich, die üblicherweise durch einen Quarzoszillator festgelegt wird. Quarzoszillatoren sind in ihrer Frequenz jedoch nach oben beschränkt, so daß der Quantisierungsfehler bei der Digitalisierung des Meßintervalls merklich eingeht.

Vorteilhaft wäre eine sehr hohe Oszillatorfrequenz; die Stabilisierung von Hochfrequenzoszillatoren verursacht jedoch einen nicht unerheblichen Schaltungsaufwand; eine dauernde Nach Eichung der Frequenz ist für präzisere Messungen unerlässlich.

Es ist das Ziel der Erfindung, unter Beseitigung der genannten Nachteile ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Entfernungsmessung zu schaffen, die eine Erhöhung der Meßgenauigkeit bei geringerer Störanfälligkeit und bei geringerem apparativem Aufwand bieten.

Gemäß der Erfindung wird dies dadurch erreicht,

- daß ein erster Bruchteil des Sendesignals über eine erste optische Verzögerungsstrecke (erste Referenzstrecke) und gleichzeitig ein zweiter Bruchteil des Sendesignals über eine zweite, optisch längere Verzögerungsstrecke (zweite Referenzstrecke) direkt dem Empfangsdetektor zugeführt und der Rest des Sendesignals zur Erzeugung des Zielsignals verwendet wird, und
- daß die Zeitdifferenz zwischen dem ersten Referenzsignal und dem Zielsignal als Maß für die Zielentfernung und die Zeitdifferenz zwischen dem ersten Referenzsignal und dem zweiten Referenzsignal als Eichmaß verwendet wird und
- daß die tatsächliche Zielentfernung aus dem Verhältnis der beiden Zeitintervalle ermittelt wird.

Durch die unterschiedliche Länge der Verzögerungsstrecken treffen die entsprechenden Signale zu verschiedenen Zeiten am Detektor ein. Somit ist bei jeder Messung durch die beiden Referenzsignale ein festes Zeitintervall, das der optischen Weglängendifferenz aus beiden Verzögerungsstrecken entspricht, vorzugeben. Das feste Zeitintervall zwischen beiden Referenzsignalen entspricht exakt einer Eichstrecke, gebildet aus der optischen Wegdifferenz zwischen beiden Referenzstrecken; es entfällt die Notwendigkeit einer genauen und stabilen Zeitbasis.

Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen und der Beschreibung, worin im Folgenden anhand der Zeichnung ein Ausführungsbeispiel beschrieben wird. Es zeigt

Fig. 1 eine schematische Darstellung des Aufbaues einer Anordnung gemäß der Erfindung,

Fig. 2 ein Diagramm der bei deren Betrieb erzeugten Signale,

Fig. 3 ein Blockschaltbild zur Erzeugung des Zeittaktes und der Zeittriggers beim Gegenstand nach Fig. 1 und

Fig. 4 eine schematische Darstellung zu einem Ausführungsbeispiel.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaues einer Anordnung gemäß der Erfindung. Die bei

dessen Betrieb erzeugten Signale sind in Fig. 2 dargestellt.

Das von einem Lasersender 10 entsprechend dem Takt eines Taktgebers 16 abgestrahlte Signal wird über eine Lichtleitfaser 11 zu einem Koppellement 12 geführt, wo ein geringer Bruchteil des Sendesignals abgespalten und über eine zugehörige Verzögerungsleitung 22, ein Koppellement 32 und eine Empfängerlichtleitfaser 31 direkt zu einem Detektor 30 gelangt. Der Großteil des Sendesignals läuft vom Koppellement 12 weiter zu einem weiteren Koppellement 13, wo wiederum ein geringer Teil des Signals abgespalten und über eine weitere, längere Verzögerungsleitung 23, ein Koppellement 33 und eine weitere Lichtleitfaser 31 wiederum zum Detektor 30 gelangt. Das verbleibende Sendesignal läuft weiter über eine Verzögerungsleitung 14 zu einer Sendeoptik 15, die den Laserstrahl in Richtung Zielobjekt (nicht dargestellt) bündelt. Das reflektierte Zielsignal gelangt über eine Empfangsoptik 35 und den Lichtleiter 31 ebenfalls zum Detektor 30.

Es erscheinen pro Messung also drei aufeinanderfolgende Signale, nämlich das erste Referenzsignal *Ref1* über den Lichtleiter 22, das zweite Referenzsignal *Ref2* über den Lichtleiter 23 und das Zielsignal *ZS*.

Je nach Länge der Verzögerungsleitungen 22, 23 und 14 erscheint das Zielsignal *ZS* entweder zwischen den beiden Referenzsignalen *Ref1* und *Ref2* oder nach den beiden Referenzsignalen. Das Zeitintervall zwischen *Ref1* und Zielsignal stellt ein Maß für die Zielentfernung dar; das Zeitintervall zwischen *Ref1* und *Ref2* hingegen ist ein Maß für die optische Eichstrecke.

Die Zielentfernung wird gewonnen durch Verhältnisbildung des Zielintervalls zum Eichintervall. Zur Realisierung der Messung werden vom Sendertakt 16 Zeitfenstersignale abgeleitet. Zwei Pulsdiskriminatoren 41 und 42 werden für die benötigten Detektorsignale durch die Zeitfenstersignale aktiviert. Der Diskriminator 41 spricht immer auf das *Ref1*-Signal an, Diskriminator 42 abwechselnd auf das Zielsignal *ZS* und auf das *Ref2*-Signal.

In Fig. 3 ist ein Ausführungsbeispiel für die Erzeugung des Zeittores für den Pulsdiskriminator 41 zur *Ref1*-Auswertung und für die Erzeugung des alternierend auf *Ref2* und Zielmessung umschaltenden Zeittores für den zweiten Pulsdiskriminator 42 dargestellt. Dabei ist mit *FF* ein bistabiler Multivibrator (Flip-Flop) und mit *MF1*, *MF2* und *MF3* je ein monostabiler Multivibrator (Mono-Flop) bezeichnet. Die Zeitkonstanten der letzteren drei sind unabhängig voneinander den jeweiligen Meßanforderungen entsprechend eingestellt.

An dem gemäß Fig. 1 nachgeordneten astablen Multivibrator 43 wird somit ein Zeitsignal erzeugt, das abwechselnd der Meßstrecke und der internen Eichstrecke entspricht. Nach Durchlaufen einer Zieldehnschaltung 44 werden die Intervalle mit Hilfe eines hochfrequenten Oszillators 46 ausgezählt und in geeigneter Form im Zähler 45 festgehalten. Es ergeben sich nach Fig. 2 ein Wert *n_Z* für die Zielmessung und ein Wert *n_K* für die Referenzmessung. Für die entsprechenden relativen Entfernungen ergeben sich:

$$D_Z = \frac{c}{2n} \cdot \frac{n_Z}{f_0} \cdot \frac{1}{k} \quad \text{und}$$

$$D_K = \frac{c}{2n} \cdot \frac{n_K}{f_0} \cdot \frac{1}{k}$$

Die absolute Zielentfernung *D* wird anschließend durch Division des digitalen Zielwertes *n_Z* durch den ebenfalls digitalen Referenzwert *n_K* und durch Multiplikation des Ergebnisses mit dem Wert der optischen Eichstrecke *D₀* ermittelt:

$$D = \frac{D_Z}{D_K} \cdot D_0 = \frac{n_Z}{n_K} \cdot D_0$$

Durch diese fortlaufende Kalibration auf eine feste optische Strecke kommen die sonst unvermeidlichen systematischen Fehler durch Stromschwankungen in der Zeitdehnschaltung und durch Instabilitäten der Zeitbasis nicht zur Auswirkung.

Die Zeitfensterumschaltung für den Diskriminator 42 erfolgt rein elektronisch. Die Diskriminatoren sind im einfachsten Fall bei hohen Signalpegeln als Schwellendiskriminatoren, oder als "zero crossing", oder als "constant fraction" Diskriminatoren ausgeführt.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines Zahlenbeispiels noch weiter erläutert. Bei Werten für

55	Laserser Pulsfrequenz	10 kHz
	Laserser Pulsbreite	1 ns
	Verzögerungsleitung 22 <i>L₂₂</i>	1 m Lichtleiter (<i>n</i> = 1.5)
	Verzögerungsleitung 23 <i>L₂₃</i>	49 m Lichtleiter (<i>n</i> = 1.5)
	optische Eichstrecke <i>L₀</i>	36 m

$$L_0 = \frac{1}{2} (L_{23} - L_{22}) \cdot n$$

$$\text{Verzögerungsleitung 14 : } L_{14} \quad 5 \text{ m Lichtleiter } (n = 1.5)$$

ergibt sich eine Anordnung nach Fig. 4 für den Meßbereich. Mit dieser Anordnung kann von 0 bis 30 m Zielstanz gemessen werden; das feste Zeitintervall *Ref1* - *Ref2* dient als 36 m lange Eichstrecke.

Wird eine Zeitdehnschaltung mit dem Dehnfaktor *K* = 300 (Kondensatorladestrom 3 mA, Entladestrom 10 µA) und ein Oszillator mit *f₀* = 500 MHz zur Auswertung verwendet, so beträgt rechnerisch die Genauigkeit

der Einzelmessung:

$$\Delta D = \frac{c}{2n_a} \cdot \frac{l}{f_a} \cdot \frac{l}{k} = 1 \text{ mm.}$$

Aufgrund statistischer Schwankungen in den Pulsdiskriminatoren, dem bistabilen Multivibrator und der Zeitdehnschaltung ist die Stabilität der Einzelmessung mit z. Z. verfügbaren Bauteilen auf ca. 30 ps beschränkt, so daß in Realität die Einzelmessgenauigkeit nicht besser als 5 mm ist. Da die systematischen Fehler durch die Erfindung weitgehend eliminiert werden, können durch Mittelwertbildung über beispielsweise 100 Messungen die statistischen Fehler so reduziert werden, so daß nach einer Meßzeit von 10 ms ein sicherer Meßwert mit einem Millimeter Genauigkeit gewonnen werden kann.

Wird in die Verzögerungsleitung 23 ein optischer Schalter eingefügt, so kann für größere Entfernungen das Signal Ref 2 abgeschaltet und die Laufzeitintervallmessung zwischen Ref 1-Signal und Zielsignal ZS in konventioneller Weise durchgeführt werden. Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit kann hierfür der Oszillator an eine Quarzreferenz angeknüpft werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist aber auch für große Meßstrecken anwendbar. Hierbei wird zweckmäßigerweise die Verzögerungsleitung 14 länger gewählt als 22 und 23. Die Signale Ref 1 und Ref 2 erscheinen dann zeitlich vor dem Zielsignal ZS am Detektor 30, und zwar selbst bei einer Zielentfernung Null.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

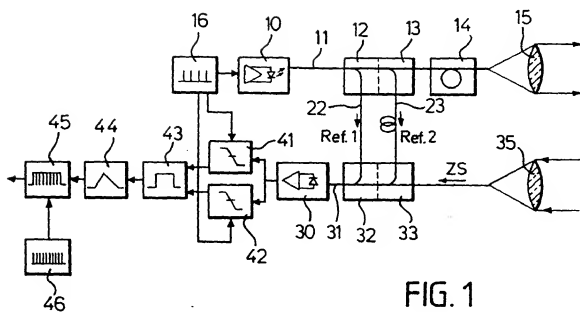


FIG. 1

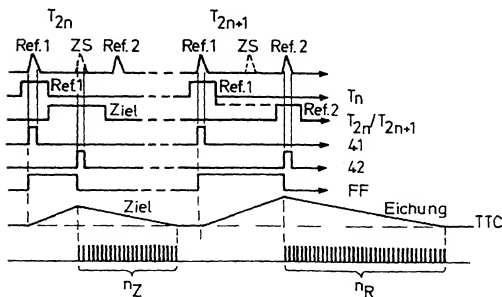


FIG. 2